中国生态农业学报 2017 年 2 月 第 25 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2017, 25(2): 157−165

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160725

胡志华, 李大明, 徐小林, 余喜初, 柳开楼, 叶会财, 周利军, 胡惠文, 黄庆海. 不同有机培肥模式下双季稻田碳汇效应与收益评估[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 157−165

Hu Z H, Li D M, Xu X L, Yu X C, Liu K L, Ye H C, Zhou L J, Hu H W, Huang Q H. Evaluation of net carbon sink effects and costs/benefits of double-cropped rice fields under different organic fertilizer applications[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 157−165

不同有机培肥模式下双季稻田碳汇效应与收益评估*

胡志华[1,2], 李大明[1,2], 徐小林[1,2], 余喜初[1,2], 柳开楼[1,2], 叶会财[1,2], 周利军[1,2], 胡惠文[1,2], 黄庆海[1,2**]

(1. 江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心 南昌 331717; 2. 农业部江西耕地保育科学观测试验站 南昌 331717)

摘 要: 本研究基于 1981 年开展的有机肥长期定位试验, 研究了不同有机肥种类、用量和施用方式对稻田生态系统碳排放、系统碳固定与净碳汇的影响, 并对各处理经济效益进行了比较, 为实现农业低碳、高值、高效生产提供理论参考。本研究所选取的有机肥处理包括: 不施肥对照(CK); 早稻施用绿肥紫云英 15 t·hm^{-2}, 晚稻不施有机肥(M1); 早稻施用两倍绿肥紫云英 30 t·hm^{-2}, 晚稻不施有机肥(M2); 早稻施用绿肥紫云英 15 t·hm^{-2}和猪粪 15 t·hm^{-2}, 晚稻不施有机肥(M3); 早稻施用绿肥紫云英 15 t·hm^{-2}+晚稻施用猪粪 15 t·hm^{-2}和冬季稻草覆盖 4 500 kg·hm^{-2}(M4); 长期施用化肥(NPK)等 5 个处理。每 5 年于晚稻收获后采集土样测定土壤有机碳含量, 并测定每年的早晚季水稻产量与生物量, 用于估算系统收益与碳收支(5 年平均)。结果表明: 与不施肥对照相比, 各施肥处理水稻产量均显著提高(P<0.05), 增幅为 30.88%~96.52%, 且随着施肥年限的增加, M4 处理增产作用最大。长期施用有机肥显著提高红壤稻田土壤固碳能力, 且有机肥用量增加系统土壤固碳能力增强, M2、M3、M4 处理土壤固碳量显著高于 M1、NPK 和 CK 处理; 稻田植株固碳量也显著提高(P<0.05), M4 和 M3 最高, 双季稻植株固碳量为 6.76~8.83 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}。长期施用有机肥下稻田系统净碳汇显著增加, 与对照相比施肥处理(M1、M2、M3、M4、NPK)系统净碳汇增加 1.43~3.93 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}, 系统碳汇效应显著(P<0.05)。同一处理不同施肥年限由生产活动所引起的碳排放量保持不变, 系统净碳汇量差异主要表现在系统固碳量上, 其变化趋势与水稻产量变化趋势基本一致。长期施用有机肥显著降低了化肥投入, 稻田生态系统经济效益显著增加(P<0.05), 并以 M4 处理最高, 达 25 683.7 ¥·hm^{-2}·a^{-1}。综上结果表明: 长期施用有机肥显著提高双季稻田碳汇效应与经济效益(P<0.05), 绿肥紫云英与猪粪和秸秆配施稻田生态系统碳汇效益与经济效益较单施绿肥紫云英优势明显。

关键词: 双季稻田; 有机培肥模式; 产量; 固碳量; 碳汇效应; 经济效益

中图分类号: S147.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)02-0157-09

Evaluation of net carbon sink effects and costs/benefits of double-cropped rice fields under different organic fertilizer applications*

HU Zhihua[1,2], LI Daming[1,2], XU Xiaolin[1,2], YU Xichu[1,2], LIU Kailou[1,2], YE Huicai[1,2],

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(41301269)、江西省水稻产业技术体系清洁生产与质量控制岗位(JXARS-02-06)和公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203030-07)资助
** 通讯作者: 黄庆海, E-mail: hqh0791@vip.sina.com
胡志华, 主要从事植物营养与生态研究。E-mail: hzh218314@yeah.net
收稿日期: 2016-08-17 接受日期: 2016-10-09

* Funded by the National Natural Science Foundation of China (41301269), the Sanitary Production and Quality Control Station of Jiangxi Province Rice Technology System (JXARS-02-06), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201203030-07)
** Corresponding author, E-mail: hqh0791@vip.sina.com
Received Aug. 17, 2016; accepted Oct. 9, 2016

ZHOU Lijun[1,2], HU Huiwen[1,2], HUANG Qinghai[1,2**]

(1. Jiangxi Institute of Red Soil / National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 331717, China; 2. Scientific Observation and Experimental Station of Arable Land Conservation (Jiangxi Province), Ministry of Agriculture, Nanchang 331717, China)

Abstract: For theoretical reference on low carbon, high profit and efficient agriculture, a long-term organic fertilizer experiment was conducted since 1981 to study the effects and economic benefits of different organic fertilizers, fertilizer doses and application methods on carbon emission and carbon sink in paddy field ecosystems. Treatments of non-fertilizer (control), *Astragalus sinicus* application in early rice (15 $t\cdot hm^{-2}$) (M1), double amount of *A. sinicus* application in early rice (30 $t\cdot hm^{-2}$) (M2), *A. sinicus* application (15 $t\cdot hm^{-2}$) plus pig manure application (15 $t\cdot hm^{-2}$) in early rice (M3), *A. sinicus* application in early rice (15 $t\cdot hm^{-2}$) plus pig manure application in late rice (15 $t\cdot hm^{-2}$) with straw mulching (4 500 $kg\cdot hm^{-2}$) in winter (M4), and NPK-chemical fertilizer in both early and late rice (NPK) were set up in the experiment. The soil samples were collected once every five years to measure organic carbon content after late rice harvest. Then rice biomass and yield were measured once every five years to evaluate the economic and carbon costs/benefits (5-year average) of the ecosystem after early rice and late rice harvest. Results showed that compared with the control, M1, M2, M3, M4 and NPK treatments significantly increased rice yield ($P < 0.05$) in a range of 30.88%–96.52%. Increase in the years promoted rice yield most under M4 treatment. Long-term organic fertilizer application significantly increased SOC (soil organic carbon) content and soil carbon sink ability. Soil carbon sink of M2, M3 and M4 treatments were significantly higher than that of M1, NPK and CK treatments. Crop carbon sink under long-term organic fertilization treatments, which was 6.76–8.83 $t(C)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ for double-cropped rice, was improved greatly. Compared with the control, net carbon sink under M1, M2, M3, M4 and NPK treatments increased significantly ($P < 0.05$) with increment of 1.43–3.93 $t(C)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$. Carbon emission caused by production activity of each treatment remained unchanged for different years of fertilizer application. The differences in net carbon sink among treatments were mainly caused by variation in carbon sink of ecosystem, whose changing trend was similar to that of rice yield. Long-term organic fertilizer application significantly reduced chemical fertilizer input, but also significantly increased the economic benefits of double-cropped rice ($P < 0.05$) to a maximum of 25 683.7 ¥$\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ (under M4 treatment). In conclusion, long-term organic fertilizer application significantly increased soil carbon sink and economic benefits. Besides, an integrated application of *A. sinicus*, pig manure and crop straw was obviously advantageous over sole application of *A. sinicus* in terms of increasing net carbon sink effects and economic benefits of paddy field ecosystem.

Keywords: Double-cropped rice field; Organic fertilizer application method; Yield; Carbon sequestration; Carbon sink effect; Economic benefit

近年来，由于温室效应引发的全球升温等气候问题引起人们的广泛关注，温室气体减排成为当前技术发展的方向与聚焦点。CH_4和CO_2是重要的温室气体，而大气中 70% CH_4和 20% CO_2来源于农业生产活动[1]，因此，探明稻田生态系统碳循环对于降低系统CH_4和CO_2排放，缓解温室效应具有重要意义。农田生态系统受自然因素和人为活动影响较大，如：耕作、施肥、灌溉等，农田生态系统中碳排放在时间与空间上变化复杂[2]，但目前对该系统的碳收支平衡研究较少[3-4]。我国是世界上最重要的水稻(*Oryza sativa*)生产国家之一，水稻产量与种植面积在全世界排名分别为第 1 和第 2[5]，因此，探明稻田生态系统的碳平衡及其变化规律和调控机制对于评价全球大气碳收支平衡与降低农田碳排放，实现农业生产低碳与可持续化具有重要的指导价值。韩冰等[6]研究表明改善耕作措施可显著降低农田生态系统的CO_2排放。施肥是重要的农事措施，对稻田生态碳汇影响显著。李洁静等[7-8]发现有机无机肥配施可显著提高水稻产量与碳汇量。彭华等[9]也得到了类似成果。此外，余喜初等[10-11]针对鄱阳湖地区长期施肥条件下双季稻田生态系统净碳汇效应的研究也表明，适当施用有机肥显著提高稻田生态系统的碳汇效应和经济效益，是实现农业生产增产、增汇、减排的有效措施。目前，关于有机肥培肥对于稻田生态系统碳汇效应的影响研究主要集中在施用有机肥与单施化肥的比较上。然而，双季稻区的有机肥种类(水稻秸秆、冬季绿肥、畜禽粪便等)较多，利用率较低，且施用方式各异。而关于不同有机培肥模式对双季稻田生态系统碳汇效应影响机制方面的研究报道较少。因此，本研究基于红壤丘陵地区江西省红壤研究所稻田有机肥长期定位试验所积累的数据，以不同有机肥培肥模式为切入点，以提升双季稻区有机肥资源利用水平为目标，选取 1981—2010 年 30 年的试验数据进行分析，研究不同有机肥种类、用量

与施用方式下双季稻田生态系统碳排放、系统固碳与净碳汇的差异，并对各处理经济效益进行比较，旨在为实现农业低碳、高值、高效生产提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于江西省南昌市进贤县江西省红壤研究所内(116°20′24″N，28°15′30″E)，属于典型的亚热带季风气候区，年均降水量 1 727 mm，年蒸发量 1 100 mm；年均气温 17.7~18.5 ℃，最冷月(1 月)平均气温 4.6 ℃，最热月(7 月)平均气温 28.0~29.8 ℃。海拔高度 25~30 m，为典型的低丘红壤地区，土壤类型为第四纪红黏土发育的潴育型水稻土。试验始于 1981 年春季，初始耕层土壤 pH 6.9，有机碳含量 16.3 $g\cdot kg^{-1}$，全氮含量 0.95 $g\cdot kg^{-1}$，全磷含量 1.02 $g\cdot kg^{-1}$，全钾含量 15.41 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮含量 144 $mg\cdot kg^{-1}$，有效磷($NaHCO_3$-P)含量 10.3 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾(NH_4OAc-K)含量 125.1 $mg\cdot kg^{-1}$。

1.2　试验设计

试验开始于 1981 年，试验共设置 9 个处理，本研究选取了 6 个施肥处理(表 1)，分别为：1)不施肥处理(CK)；2)早稻施用绿肥(M1)；3)早稻施用两倍绿肥(M2)；4)早稻施用绿肥和猪粪(M3)；5)早稻施用绿肥+晚稻施用猪粪和冬季稻草覆盖(M4)；6)长期施用化肥(NPK)。小区面积为 60 m^2，顺序排列，3 次重复，各处理施肥见表 1。其中有机肥、磷肥和钾肥作基肥，氮肥分两次施(其中基肥 50%，追肥 50%)，试验所用水稻品种为本区常用品种，每 5 年更换一次，株行距为 20 cm×20 cm。其他各项田间农事管理同当地一般高产栽培管理措施一致。本试验所用有机肥为紫云英(*Astragalus sinicus*)、鲜猪粪和秸秆，其养分情况见表 2。

表 1　红壤稻田有机肥长期定位试验处理施肥量

Table 1　Fertilizers application rates of treatments of the long-term organic fertilizer experiment in the red paddy soil　$kg\cdot hm^{-2}$

处理 Treatment	处理描述 Treatment description	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		过冬 Winter
		紫云英 *Astragalus sinicus*	猪粪 Pig mature	化肥 Chemical fertilizer	猪粪 Pig mature	化肥 Chemical fertilizer	稻草 Straw
CK	不施肥对照 Non-fertilization	—	—	—	—	—	—
NPK	长期施用化肥 Chemical fertilization both in the early and later rice	—	—	N: 90; P_2O_5: 45; K_2O:75	—	N: 90; P_2O_5: 45; K_2O: 75	—
M1	早稻施用绿肥紫云英，晚稻不施有机肥 *Astragalus sinicus* application only in the early rice	22 500	—	—	—	—	—
M2	早稻施用两倍绿肥紫云英 Double amount of *Astragalus sinicus* application only in the early rice	45 000	—	—	—	—	—
M3	早稻施用绿肥紫云英和猪粪，晚稻不施有机肥 *Astragalus sinicus* with pig manure application only in the early rice	22 500	22 500	—	—	—	—
M4	早稻施用绿肥紫云英+晚稻施用猪粪+冬季稻草覆盖 *Astragalus sinicus* application in the early rice and pig manure application in later rice and straw mulching in winter	22 500	—	—	22 500	—	4 500

为保障水稻正常生长，1981—1988 年，M1、M2、M3、M4 和 NPK 处理每季(NPK 处理为晚稻季)补施化肥 N 45 $kg\cdot hm^{-2}$、P_2O_5 30 $kg\cdot hm^{-2}$；1989—1995 年，在上述化肥的基础上，每季补施 K_2O 37.5 $kg\cdot hm^{-2}$；1996 年早稻开始，每季补施的 N、P_2O_5、K_2O 分别增至 69 $kg\cdot hm^{-2}$、30 $kg\cdot hm^{-2}$、67.5 $kg\cdot hm^{-2}$。In order to guarantee the rice growth, we added 45 $kg\cdot hm^{-2}$ N, 30 $kg\cdot hm^{-2}$ P_2O_5 from 1981 to 1988 in both early and late rice seasons (except NPK treatment only in late rice season); 45 $kg\cdot hm^{-2}$ N, 30 $kg\cdot hm^{-2}$ P_2O_5, 37.5 $kg\cdot hm^{-2}$ K_2O from 1989 to 1995 in both early and late rice seasons; and 69 $kg\cdot hm^{-2}$, 30 $kg\cdot hm^{-2}$ and 67.5 $kg\cdot hm^{-2}$ from 1996 in early rice season, to M1, M2, M3, M5 and NPK treatments, respectively.

表 2　试验用有机肥养分状况

Table 2　Nutrients contents of organic fertilizers applied in the experiment

有机肥 Organic fertilizer	含水量 Moisture (%)	有机质含量 Organic matter content ($g\cdot kg^{-1}$)	氮含量 Nitrogen content ($g\cdot kg^{-1}$)	磷含量 Phosphorus content ($g\cdot kg^{-1}$)	钾含量 Potassium content ($g\cdot kg^{-1}$)
紫云英 *Astragalus sinicus*	80.5±2.6	467±5.9	8.0±0.53	2.2±0.19	7.0±0.35
猪粪 Pig mature	70.6±2.1	340±5.1	12.0±0.47	9.0±0.42	10.0±0.44
稻草 Straw	49.2±1.8	421±3.9	6.6±0.39	2.4±0.13	15.2±0.39

1.3　测定内容

试验期间每 5 年测定 1 次水稻产量、生物量及土壤碳含量和容重。水稻产量为早稻与晚稻各小区单打单收的实际产量之和，水稻生物量为早晚稻收

割时所取植株样测定。土壤碳含量为晚稻收获后采集耕层(1~17 cm)土样，采用鲁如坤[12]方法测定土壤有机含量后换算所得；土壤容重采用环刀法测定[12]。各处理物资及资源投入和产出数据为 1981—2011 年 30 年间的平均值，农产品收获后的经济效益均以 2015 年的市场价格进行估算(表 3)，研究所涉及的只是特定作物从播种到收获产品期间的物质循环及经济价值，不涉及产品的去向。

表 3 水稻田间生产年均投入量
Table 3 Annual input in field production for paddy field

项目 Item	投入量 Input amount	投入金额 Cost
种子 Seeds	60 kg·hm^{-2}	750 ¥·hm^{-2}
化肥 Fertilizers	N 180 kg·hm^{-2}, P 90 kg·hm^{-2}, K 150 kg·hm^{-2}	尿素 940 ¥·hm^{-2}，氯化钾 750 ¥·hm^{-2}，钙镁磷肥 360 ¥·hm^{-2} Urea 940 ¥·hm^{-2}, potassium chloride 750 ¥·hm^{-2}, Ca-Mg phosphate fertilizer 360 ¥·hm^{-2}
农药 Pesticides	7.5 kg·hm^{-2}	750 ¥·hm^{-2}
灌溉 Irrigation	7 000 t·hm^{-2}	450 ¥·hm^{-2}
机电 Diesel and power	耗油 37.5 L·hm^{-2}，耗电 70 kW·h·hm^{-2} Diesel 37.5 L·hm^{-2}, power 70 kW·h·hm^{-2}	柴油 300 ¥·hm^{-2}，耗电 56 ¥·hm^{-2} Diesel 300 ¥·hm^{-2}, power 56 ¥·hm^{-2}
人工 Labors	30~45 person·d·hm^{-2}	40 ¥·(person·d)$^{-1}$

各项投入和价格为 2015 年当地调查获得。Each input and price was got from the local investigation in 2015.

1.4 研究方法

本研究对象为红壤地区双季稻田生态系统，边界为不同的试验田块，碳固定-排放及经济投入-收益分析的对象是土壤-作物系统及系统中附加的农事活动投入，如：耕作、灌溉、农药、收割等。本研究参照李洁静等[7-8]的方法计算双季稻田生态系统碳平衡、碳吸收量、碳排放量和系统经济流等相关的参数，具体研究方法如下：

系统碳吸收量(C_a)计算：

$$C_a=C_{crop}+C_{SOC} \tag{1}$$

式中：C_{crop} 表示作物地上部固碳量，C_{SOC} 为土壤有机碳。

系统碳排放量(C_e)，本研究所涉碳排放为生产活动中涉及的碳排放(E_h)，为农用化学品(农药、化肥等)投入涉及的能源碳排放(C_{ac})、农事管理投入的碳排放(C_m)与农田作业时人工投入的碳排放(C_l)之和：

$$C_e=E_h=C_{ac}+C_m+C_l \tag{2}$$

系统净碳汇(C_s)通过吸收与排放的碳平衡计算：

$$C_s=C_a-C_e \tag{3}$$

碳分项参数估算：

作物地上部固碳量(C_{crop})估算：

$$C_{crop}=(Y_{er}+Y_{lr})\times C_f \tag{4}$$

式中：Y_{er} 为早稻生物产量；Y_{lr} 为晚稻生物产量；C_f 为作物合成单位生物量干物质所吸收的大气碳，水稻取值为 0.41。

土壤有机碳(C_{SOC})计算：

$$C_{SOC}=W_s\times(X_y-X_o)/1.724 \tag{5}$$

式中：W_s 为每公顷耕作层土重，通过供试土壤的容重换算，X_y 为取样年分土壤的有机质含量，X_o 为试验开始年原始土壤的有机质含量，1.724 为有机质与碳的换算系数。

农用化学品(农药、化肥等)投入涉及的能源碳排放(C_{ac})，化学品投入涉及的碳排放包括杀虫剂生产碳排放($C_{pesticides}$)和肥料生产碳排放($C_{fertilizers}$)：

$$C_{ac}=C_{pesticides}+C_{fertilizers} \tag{6}$$

$$C_{pesticides}=V_{in\text{-}CO_2}\times W_p \tag{7}$$

式中：$V_{in\text{-}CO_2}$ 为生产杀虫剂的 CO_2 排放，取值 4 931.93 kg(C)·Mg^{-1}；W_p 为农药施用量(kg·hm^{-2})。

$$C_{fertilizers}=\sum_i U_{fi\text{-}CO_2}\times W_{fi} \tag{8}$$

式中：$U_{fi\text{-}CO_2}$ 为生产 1 t 化肥的碳排放；i 表示不同的肥料种类，氮肥生产的碳排放为 1.74 t(C)·t^{-1}；磷肥和钾肥产生的碳排放分别为 165.09 kg(C)·t^{-1} 和 120.28 kg(C)·t^{-1}；W_{fi} 为单位面积的化肥施用量(kg·hm^{-2})。

农事管理投入的碳排放(C_m)计算，包括灌溉活动的碳排放($C_{irrigation}$)、机耕与机收活动的碳排放($C_{machine}$)：

$$C_m=C_{irrigation}+C_{machine} \tag{9}$$

灌溉活动的碳排放($C_{irrigation}$)估算：

$$C_{irrigation}=V_{irrigation\text{-}CO_2}\times W \tag{10}$$

式中：$V_{irrigation\text{-}CO_2}$ 为煤电的碳强度系数，0.92 kg(CO_2)·(kW·h)$^{-1}$；W 为灌溉所用的电量(kW·h)。

机械能源的碳排放($C_{machine}$)：

$$C_{machine}=V_{m\text{-}CO_2}\times L \tag{11}$$

式中：$V_{m\text{-}CO_2}$ 为柴油的碳强度系数，2.63 kg(CO_2)·L^{-1}；L 为每年单位面积机耕与机收总耗油量(L)。

农田作业时人工投入的碳排放(C_l)计算：

$$C_l=V_{CO_2}\times N_l \tag{12}$$

式中：V_{CO_2} 为成人(体重 60 kg)每天呼出的 CO_2 体积；N_l 为一个作物生长季投入的人工总数(人·d^{-1})。

1.5 数据处理

本研究选取 1981—2010 年 30 年的试验数据，并

用 SAS 9.2 数据分析软件进行统计分析，显著性差异用 Duncan 法比较，并用 Microsoft Excel 绘图工具进行绘图。

2　结果与分析

2.1　长期施用有机肥对水稻产量的影响

长期施用有机肥显著影响水稻产量(图 1)。与不施肥对照相比较，施肥处理(M1、M2、M3、M4、NPK)产量均显著增长(P<0.05)1.95~4.87 t·hm^{-2}，增幅为30.88%~96.52%。有机肥施用量、种类和施用方式对水稻产量影响显著，随着施肥年限的增加，早稻施用绿肥+晚稻施用猪粪和冬季稻草覆盖(M4)处理对水稻产量增长的促进作用最大，其次为早稻施用绿肥和猪粪(M3)处理，均显著高于 M2 和 NPK 处理，M1处理对水稻增产作用最小。增加有机肥用量可提高水稻产量，且猪粪、秸秆与紫云英配施对双季水稻的增产效果较单一施用绿肥紫云英具有明显优势。

2.2　不同有机肥管理模式系统碳排放状况

本试验自开展以来每年施肥、农药、灌溉等田间管理水平基本一致，因此，不同施肥年限间同一施肥处理由生产活动所引起的碳排放量无明显差异(表 4)。不同施肥处理间由生产活动所引起的系统碳排放量差异主要表现在化肥施入量和人工投入的差异上，其中不施肥(CK)处理最低，为 1.06 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}，显著低于其他处理(P<0.05)，最高为单施化肥(NPK)处理，碳排放达 1.34 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}，其次为早稻施用绿肥+晚稻施用猪粪和冬季稻草覆盖(M4)处理，为1.32 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}。

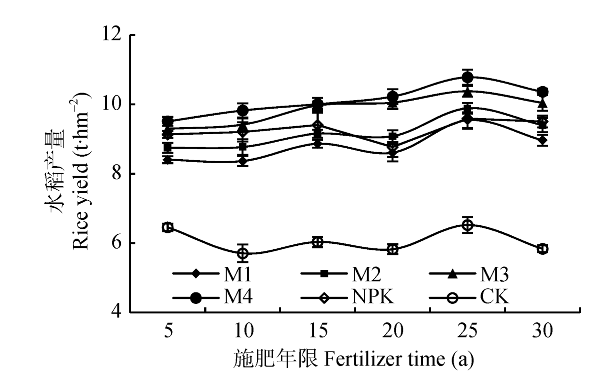


图 1　长期施用有机肥对水稻产量的影响

Fig. 1　Effect of long-term organic fertilization application on the rice yield

表 4　不同有机肥管理模式农田生态系统碳排放量

Table 4　Carbon emission of field ecosystem under different organic fertilizer managements

处理 Treatment	碳排放 Carbon emission [t(C)·hm^{-2}·a^{-1}]					
	灌溉 Irrigation	耕作 Tillage	施肥 Fertilization	农药 Pesticide	生产活动 Labor	总排放 Total emission
M1	0.54a	0.06a	0.06a	0.06a	0.48c	1.20b
M2	0.54a	0.06a	0.06a	0.06a	0.56b	1.28ab
M3	0.54a	0.06a	0.06a	0.06a	0.56b	1.28ab
M4	0.54a	0.06a	0.06a	0.06a	0.60a	1.32a
NPK	0.54a	0.06a	0.24b	0.06a	0.44d	1.34a
CK	0.54a	0.06a	0c	0.06a	0.40e	1.06c

2.3　不同有机肥管理模式下系统碳固定

2.3.1　有机肥管理模式对土壤固碳量的影响

不同有机肥施用量、种类与施用模式等对双季稻田生态系统土壤固碳量影响显著(图 2)。试验初始 0~5 a 不施肥(CK)与单施化肥(NPK)处理土壤碳含量均有所下降，施用有机肥显著提高稻田生态系统的土壤固碳量，且早稻施用绿肥+晚稻施用猪粪和冬季稻草覆盖(M4)处理以 0.263 t(C)·hm^{-2}·a^{-1} 的固碳量最高，其次为 M3，而 M2、M1 处理系统土壤含碳量基本维持原有水平。随着施肥年限的增加各处理土壤含碳量在施肥 10 a 后开始增长，且 M2、M3、M4 处理土壤固碳量逐渐趋于一致并显著高于其他处理，其次为 M1和单施化肥(NPK)处理，不施肥处理(CK)固碳量最低。表明长期施用有机肥能显著提升稻田生态系统土壤固碳量，且有机肥用量增加提高系统土壤固碳量。

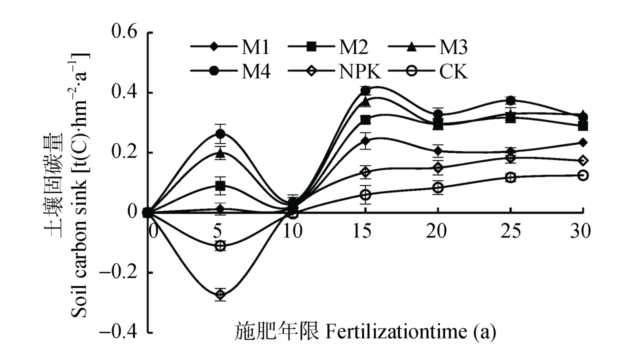


图 2　长期施用有机肥对稻田生态系统土壤固碳量的影响

Fig. 2　Effect of long-term organic fertilization on the soil carbon sink of paddy field ecosystem

2.3.2　不同施肥模式下植株固碳状况

长期施用有机肥显著提高红壤稻田水稻产量与干物质积累，处理间植株固碳量存在显著差异(表 5)。试验期间各处理植株双季固碳量均以不施肥(CK)最低，

为 4.03~5.28 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}，显著低于其他施肥处理(P<0.05)，M4 处理植株固碳量最高，为 6.76~8.83 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}。M3 和 M4 处理植株固碳量仅在施肥 20 a 时存在显著差异，且试验期间植株双季固碳量均显著高于其他处理(P<0.05)；试验开展初始 NPK 处理植株双季固碳量与 M3 和 M4 处理基本一致，随着施肥年限的增加，施肥 15 a 后显著低于 M3 和 M4 处理(P<0.05)；试验期间 M1 处理植株双季固碳量均显著高于 CK，但显著低于其他施肥处理(P<0.05)；试验开始初期 M2 处理植株双季固碳量显著低于 NPK(P<0.05)，施肥 10 a 后两处理间无显著差异。这些结果表明施用有机肥对增加水稻植株固碳量的效果优于长期施用化肥，且增加有机肥用量对固碳量的增加效果显著，此外，紫云英、猪粪和秸秆混用处理效果显著优于单一施用紫云英处理。

江西是我国重要的双季稻区，早晚季水稻生长与固碳作用是两个相对独立的过程。本试验结果表明不同施肥处理对早晚季水稻植株固碳量具有显著影响(表 5)。试验前期 M3 和 NPK 处理早稻植株固碳量显著高于其他处理，而随着施肥时间的延长，施肥 15 a 后 M4 处理早稻植株固碳量与 M3 处理无显著差异，施肥 20 a 后显著高于 NPK 处理(P<0.05)。晚稻植株固碳量也表现出类似趋势，初期 M4 处理最高，且显著高于其他处理，随着施肥的进行与 M3 处理基本一致并显著高于其他处理。

表 5 不同有机肥管理模式下农田生态系统植株固碳情况

Table 5 Status of crop carbon sink in agricultural ecosystem under different organic fertilizer managements t(C)·hm^{-2}·a^{-1}

	处理 Treatment	施肥年限 Fertilizer time (a)					
		5	10	15	20	25	30
双季总量 Double season	M1	5.91±0.18c	5.85±0.22d	6.83±0.19d	6.79±0.14d	7.55±0.24c	6.58±0.15d
	M2	6.25±0.13b	6.24±0.14b	7.19±0.12b	7.22±0.18c	8.01±0.18b	7.06±0.18bc
	M3	6.73±0.09a	6.74±0.03a	7.75±0.13a	7.88±0.08b	8.71±0.16a	7.71±0.20a
	M4	6.76±0.16a	6.90±0.09a	7.81±0.33a	8.22±0.09a	8.83±0.21a	7.97±0.06a
	NPK	6.62±0.09a	6.62±0.07ab	7.35±0.05b	6.98±0.17cd	7.82±0.11b	7.10±0.03c
	CK	4.52±0.20d	4.18±0.27e	4.03±0.30e	4.63±0.19e	5.28±0.33d	4.40±0.32e
早稻 Early season	M1	3.25±0.045c	2.95±0.17d	3.36±0.17b	3.33±0.05c	4.13±0.10c	3.32±0.12c
	M2	3.51±0.076b	3.17±0.09c	3.49±0.09b	3.58±0.08b	4.48±0.05b	3.59±0.16b
	M3	3.88±0.067a	3.52±0.02a	3.87±0.05a	3.92±0.02a	4.86±0.04a	3.87±0.13a
	M4	3.45±0.11b	3.28±0.02bc	3.79±0.17a	3.80±0.05a	4.81±0.14a	3.88±0.02a
	NPK	3.77±0.10a	3.42±0.06ab	3.75±0.06a	3.52±0.06b	4.31±0.07b	3.63±0.06b
	CK	2.20±0.12d	1.79±0.14e	1.93±0.15c	2.01±0.15d	2.46±0.16d	1.82±0.20d
晚稻 Late season	M1	2.66±0.14c	2.90±0.12c	3.47±0.07b	3.46±0.09d	3.42±0.14b	3.27±0.03d
	M2	2.74±0.09bc	3.07±0.15bc	3.66±0.09b	3.63±0.11c	3.54±0.14b	3.47±0.09c
	M3	2.86±0.13b	3.22±0.05b	3.87±0.11a	3.97±0.09b	3.85±0.12a	3.85±0.07b
	M4	3.31±0.05a	3.62±0.08a	4.06±0.15a	4.42±0.06a	4.02±0.08a	4.09±0.05a
	NPK	2.85±0.01b	3.19±0.08b	3.60±0.11b	3.46±0.11d	3.50±0.05b	3.47±0.03c
	CK	2.32±0.10d	2.39±0.14d	2.09±0.16c	2.62±0.04e	2.82±0.19c	2.59±0.12e

同列中不同字母表示在 0.05 水平差异显著。Data of the same variety in each column followed different letters indicate significant at 0.05 level.

2.4 系统净碳汇变化特征

不同有机肥管理模式显著影响双季稻田生态系统的净碳汇量(图 3)。其变化特征与水稻产量变化较为一致，其中以早稻施用绿肥+晚稻施用猪粪和冬季稻草覆盖(M4)处理的系统净碳汇效应最大，其次为早稻施用绿肥和晚稻施用猪粪(M3)处理，且 M3 和 M4 处理在施肥 15 a 后系统净碳汇显著高于 NPK 处理(P<0.05)，系统净碳汇分别增加 0.61~1.07 t(C)·hm^{-2}·a^{-1} 和 0.66~1.41 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}；M2 与 NPK 处理间系统净碳汇无显著差异，且除施肥 20 a 外均显著高于 M1 处理；各施肥处理系统净碳汇试验期间均显著高于不施肥处理(P<0.05)，系统净碳汇增加 1.43~3.93 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}。同一处理不同施肥年限净碳汇存在一定波动性，但各处理变化趋势与水稻产量变化趋势一致，该差异可能受不同品种差异及不同年份气候变化等因素的影响。

2.5 不同有机肥管理模式对稻田生态系统经济效益的影响

本系统经济效益主要受水稻产量与生产投入成本影响(图 4)，不同处理间在生产投入上存在显著差异，

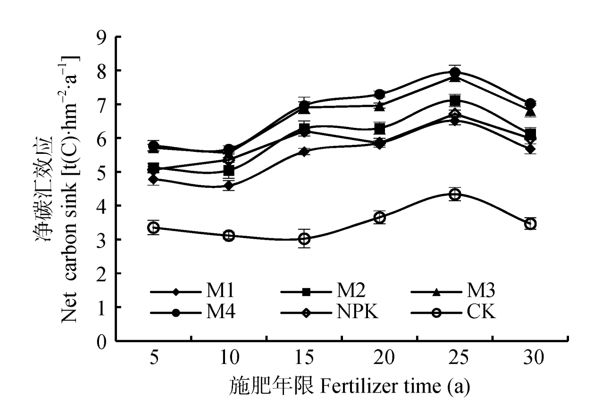


图 3　不同有机肥管理模式对双季稻田生态系统净碳汇量的影响

Fig. 3　Effect of different organic fertilizer managements on the net carbon sink production in the double rice eco-system

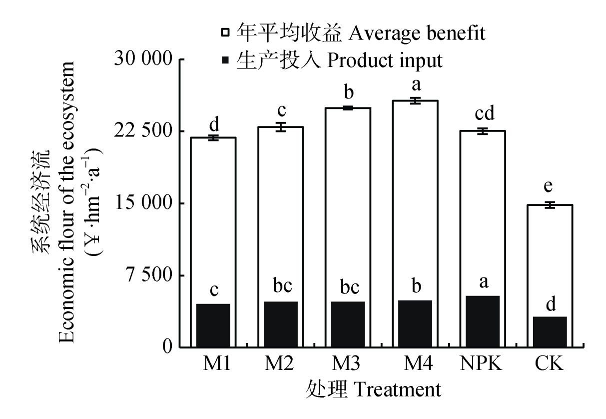


图 4　不同有机肥管理模式下稻田生态系统经济效益对比

Fig. 4　Comparison of the economic benefit of paddy field ecosystem under different organic fertilizers managements

其中以单施化肥(NPK)处理最高，达 5 256 ¥·hm^{-2}·a^{-1}，显著高于其他处理(P<0.05)；不施肥对照(CK)最低，为 3 206 ¥·hm^{-2}·a^{-1}；各有机肥处理间生产投入差异主要来自于生产中的人工投入差异。不同施肥处理显著影响水稻产量，进而显著影响稻田生态系统的经济效益。如图 4 所示，与对照相比各施肥处理(M1、M2、M3、M4、NPK)稻田生态系统的经济效益均显著增加(P<0.05)，不同施肥处理间经济效益也存在显著差异，其表现与各施肥处理产量差异基本一致，以早稻施用绿肥+晚稻施用猪粪和冬季稻草覆盖(M4)处理最高，达 25 683.7 ¥·hm^{-2}·a^{-1}，其次为早稻施用绿肥和晚稻施用猪粪(M3)处理，显著高于长期施用化肥(NPK)处理，而早稻施用绿肥(M1)处理增效作用最小，与 NPK 无显著差异。

3　讨论

3.1　不同培肥模式对双季稻田碳汇效应的影响

研究表明近 100 年内全球表面平均温度上升近 1 ℃[13]。全球气温上升，极端天气频发日益成为制约我国水稻产量的重要因子，高温等胁迫容易引起水稻生长变缓、分蘖减少、花粉不育、结实率降低等，显著降低水稻产量与品质[14-17]。CO_2 和 CH_4 等温室气体排放是引起全球气温上升的重要原因之一，其中农田生态系统排放量占很大比例。前人为了降低农田生态系统碳排放，缓解由之引发的温室效应，提升其固碳作用实现农业生产生态可持续化发展，做了大量的研究。梁二等[18]利用我国第 1 次和第 2 次土壤普查数据分析了我国各地农田土壤碳的变化趋势，估算了农田土壤碳源、汇潜力，为农田土壤碳汇能力及其农田土壤固碳潜力等研究提供了方法和依据。张海林等[19]研究发现保护性耕作减轻了对土壤的侵蚀和损伤，降低了表层有机碳的流失，显著提高了表层土壤有机质含量。吴家梅等[20]研究表明稻草还田碳汇效应显著，且稻草覆盖免耕显著降低了稻田 CH_4 的排放。本研究结果表明长期施用有机肥显著提高土壤有机质含量和土壤固碳能力，这与余喜初等[10-11]研究结果较为一致，且李洁静等[8]在太湖等地区开展的研究也取得类似的成果。此外，本研究通过对不同有机肥施用模式下双季稻田碳汇效应分析发现，早稻施用绿肥+晚稻施用猪粪和冬季稻草覆盖(M4)和早稻施用绿肥和晚稻施用猪粪(M3)处理系统碳汇均显著高于早稻施用两倍绿肥(M2)处理，且 M2 处理系统碳汇显著高于早稻施用绿肥(M1)处理，表明有机肥施用量增加可使稻田生态系统固碳能力明显增强，且绿肥紫云英、猪粪、稻草等有机肥混合施用较单一施用绿肥紫云英碳汇效应显著，这可能与不同有机肥的养分组成及其在土壤中腐解与释放特征有关，表 2 可以发现猪粪氮磷钾养分较为均衡，而绿肥季稻草磷元素含量明显偏低，这为稻田系统有机肥的合理使用提供了重要的理论支撑。然而不同种类有机肥在土壤中降解对双季稻田生态系统碳汇效应的影响机制尚不清晰，需进一步研究。

3.2　长期施用有机肥对双季稻田经济效益的影响

水稻生产是我国农民重要的收入来源，因此，获取较高的经济效益是农民生产的首要目的。稻田生态系统经济效益由生产投入成本与稻田谷物产值共同组成。本研究发现与施用化肥处理相比，施用有机肥处理显著降低了水稻生产中化肥投入成本，其中 M3 和 M4 处理年均收益均显著高于施用化肥(NPK)处理(P<0.05)。余喜初等[8,10-11]也发现有机无机肥配施可显著提高稻田生态系统的经济效益。此外，本研究还发现绿肥紫云英与其他有机肥(秸秆、猪粪等)配施(M3，M4)系统经济效益显著高于单一施用绿肥紫云英(M1，M2)(P<0.05)，其中以 M4 处理

最高，达 25 683.7 ¥·hm^{-2}·a^{-1}。因此，合理施用有机肥和化肥是提高稻田系统经济效益的重要手段。

3.3 有机培肥的生态效益

我国是世界上最大的发展中国家，人口巨大，耕地资源等匮乏，且当前环境形势恶劣等因素一直制约着我国农业的发展。因此，发展生态高值农业是克服这些难题重要途径，也是我国农业可持续发展的重要出路[21]。施肥是农业生产中不可缺少的农事活动，本研究发现长期施用有机肥显著增加了土壤有机质含量与水稻产量，其中以早稻施用绿肥+晚稻施用猪粪和冬季稻草覆盖(M4)处理下稻田生态系统碳汇效应与经济效益最佳，显著高于对照及其他施肥处理。由此可见，合理施用有机肥可显著降低水稻生产中化肥用量与碳排放，对于实现水稻生产节本增效与生态可持续化具有重要意义，符合我国生态高值农业的要求。

4 结论

长期施用有机肥显著提升了红壤稻田系统的碳汇效应和经济效益。与不施有机肥相比，各有机肥处理的土壤有机碳显著提升，固碳能力和生产能力显著增强，系统净碳汇增加显著，与不施肥对照相比较，各施肥处理(M1、M2、M3、M4、NPK)系统净碳汇增加 1.43~3.93 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}，且与单施化肥相比较，施肥 15 a 后早稻施用绿肥+晚稻施用猪粪和冬季稻草覆盖(M4)处理和早稻施用绿肥和晚稻施用猪粪(M3)处理系统净碳汇显著增加(P<0.05)，增加量为 0.61~1.41 t(C)·hm^{-2}·a^{-1}。同时，长期施用有机肥降低了化肥投入，生产成本降低 362~722 ¥·hm^{-2}·a^{-1}，经济效益增加明显，M4 处理以 25 683.7 ¥·hm^{-2}·a^{-1} 最高，显著高于其他处理(P<0.05)。此外，不同有机培肥模式间稻田生态系统碳汇效应与经济效益存在显著差异，增加有机肥投入可提高系统碳汇效应与经济效益，与单一施用绿肥处理相比，绿肥、猪粪和秸秆配施处理的碳汇效应与经济效益均增加。因此，合理调控有机肥种类对于提升稻田生态系统碳汇效应与经济效益具有重要意义，高度契合生态高值农业的发展要求，有利于实现红壤稻田农业的节本增效生产及生态的可持续化发展。

参考文献 References

[1] 马秀梅, 朱波, 杜泽林, 等. 冬水田休闲期温室气体排放通量的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 24(6): 1199–1202
Ma X M, Zhu B, Du Z L, et al. CH_4, CO_2 and N_2O emissions from the year-round flooded paddy field at fallow season[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 24(6): 1199–1202

[2] Martens D A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(3): 361–369

[3] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 463–469
Duan X N, Wang X K, Lu F, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 463–469

[4] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2008, 363(1492): 789–813

[5] 朱德峰, 程式华, 张玉屏, 等. 全球水稻生存现状与制约因素分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 474–479
Zhu D F, Chen S H, Zhang Y P, et al. Analysis of status and constraints of rice production in the world[J]. China Agriculture Science, 2010, 43(3): 474–479

[6] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 612–619
Han B, WangX K, Lu F, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 612–619

[7] 李洁静, 潘根兴, 李恋卿, 等. 红壤丘陵双季稻稻田农田生态系统不同施肥下碳汇效应及收益评估[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2520–2525
Li J J, Pan G X, Li L Q, et al. Estimation of net carbon balance and benefits of rice-rice cropping farm of a red earth paddy under long term fertilization experiment from Jiangxi, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2520–2525

[8] 李洁静, 潘根兴, 张旭辉, 等. 太湖地区长期施肥条件下水稻-油菜轮作生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1664–1670
Li J J, Pan G X, Zhang X H, et al. An evaluation of net carbon sink effect and cost/benefits of a rice-rape rotation ecosystem under long-term fertilization from Tai Lake region of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1664–1670

[9] 彭华, 纪雄辉, 刘昭兵, 等. 洞庭湖地区长期施肥条件下双季稻田生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2526–2532
Peng H, Ji X H, Liu Z B, et al. Evaluation of net carbon sink effect and economic benefit in double rice Field ecosystem under long-term fertilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2526–2532

[10] 余喜初, 李大明, 黄庆海, 等. 鄱阳湖地区长期施肥双季稻田生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1777–1782
Yu X C, Li D M, Huang Q H, et al. Net carbon sink effects and economic benefits in double rice ecosystem under long-term fertilization in poyang lake region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1777–1782

[11] 余喜初, 黄庆海, 李大明, 等. 鄱阳湖地区长期施肥双季稻稻田生态系统净碳汇效应变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 1031–1036
Yu X C, Huang Q H, Li D M, et al. Dynamic of net carbon

sink effects and economic benefits in double rice ecosystem under long-term fertilization in poyang lake region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(5): 1031–1036
[12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. Soil Argrochemistry Analysis Protocoes[M]. Beijing: China Agriculture Science Press, 2000
[13] Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group Ⅱ to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
[14] 曹云英, 段骅, 杨立年, 等. 减数分裂期高温胁迫对耐热性不同水稻品种产量的影响及其生理原因[J]. 作物学报, 2008, 34(12): 2134–2142
Cao Y Y, Duan H, Yang L N, et al. Effect of heat-stress during meiosis on grain yield of rice cultivars differing in heat-tolerance and its physiological mechanism[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(12): 2134–2142
[15] 段骅, 杨建昌. 高温对水稻的影响及其机制的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(4): 393–400
Duan H, Yang J C. Research advances in the effect of high temperature on rice and its mechanism[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(4): 393–400
[16] 魏金连, 潘晓华, 邓强辉. 不同生育阶段夜温升高对双季水稻产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 331–337
Wei J L, Pan X H, Deng Q H. Effects of nighttime temperature increase at different growth stages on double season rice grain yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 331–337
[17] 吴自明, 时红, 石秀兰, 等. 夜温升高对双季晚稻产量和品质影响[J]. 核农学报, 2014, 28(4): 708–713
Wu Z M, Shi H, Shi X L, et al. The effects of the elevated nighttime temperature on the yield and quality of double season late rice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(4): 708–713
[18] 梁二, 蔡典雄, 代快, 等. 中国农田土壤有机碳变化: Ⅱ土壤固碳潜力估算[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 87–92
Liang E, Cai D X, Dai K, et al. Changes in soil organic carbon in croplands of China: Ⅱ Estimation of soil carbon sequestration potentials[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2010(6): 87–92
[19] 张海林, 孙国峰, 陈继康, 等. 保护性耕作对农田碳效应影响研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4275–4281
Zhang H L, Sun G F, Chen J K, et al. Advances in research on effects of conservation tillage on soil carbon[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(12): 4275–4281
[20] 吴家梅, 纪雄辉, 彭华, 等. 南方双季稻田稻草还田的碳汇效应[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3196–3202
Wu J M, Ji X H, Peng H, et al. Carbon sequestration effects of rice straw return in double season paddy field in Southern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3196–3202
[21] 赵其国, 黄季焜, 段增强. 我国生态高值农业的内涵, 模式及其研发建议[J]. 土壤, 2012, 44(5): 705–711
Zhao Q G, Huang J K, Duan Z Q. Proposals on connotation, mode, research and development of ecological high-value agriculture of China[J]. Soils, 2012, 44(5): 705–711